

## 4. Vecteurs d'énergie

### 4.3 – L'Hydrogène

#### *Partie 2 – Production, Stockage, Transport et Utilisations*

Daniel R. Rousse, Ph.D., Ing.

*Département de génie mécanique*

Tanguy Lunel, M.Sc.A.

Ivan de la Cuesta, M. Ing.

Théo Delpech, M.Sc.A., Bastien Thomasset, M.Sc.A.

Maxime Ott, M. Ing., Louis Flamand, M. Ing., Sarah Homsy, M. Ing.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Production
- Stockage
- Transport et distribution
- Utilisations
- Conclusion

# Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Production
- Stockage
- Transport et distribution
- Utilisations
- Conclusion

# Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Propriétés fondamentales
- Production
  - Vaporeformage
  - Renouvelable
- Utilisations
  - Actuelles
  - Potentielles
- Conclusion

# Introduction

- Après avoir présenter des éléments à caractères historiques et généraux sur l'hydrogène, cette présentation s'attarde à ses caractéristiques pratiques.

# Objectifs

- Comprendre comment on
  - produit,
  - stocke,
  - transporte et
  - utilise
- l'hydrogène

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Production***
  - ***Vaporeformage***
  - ***Renouvelable***
- Stockage
- Transport et distribution
- Utilisations
- Conclusion

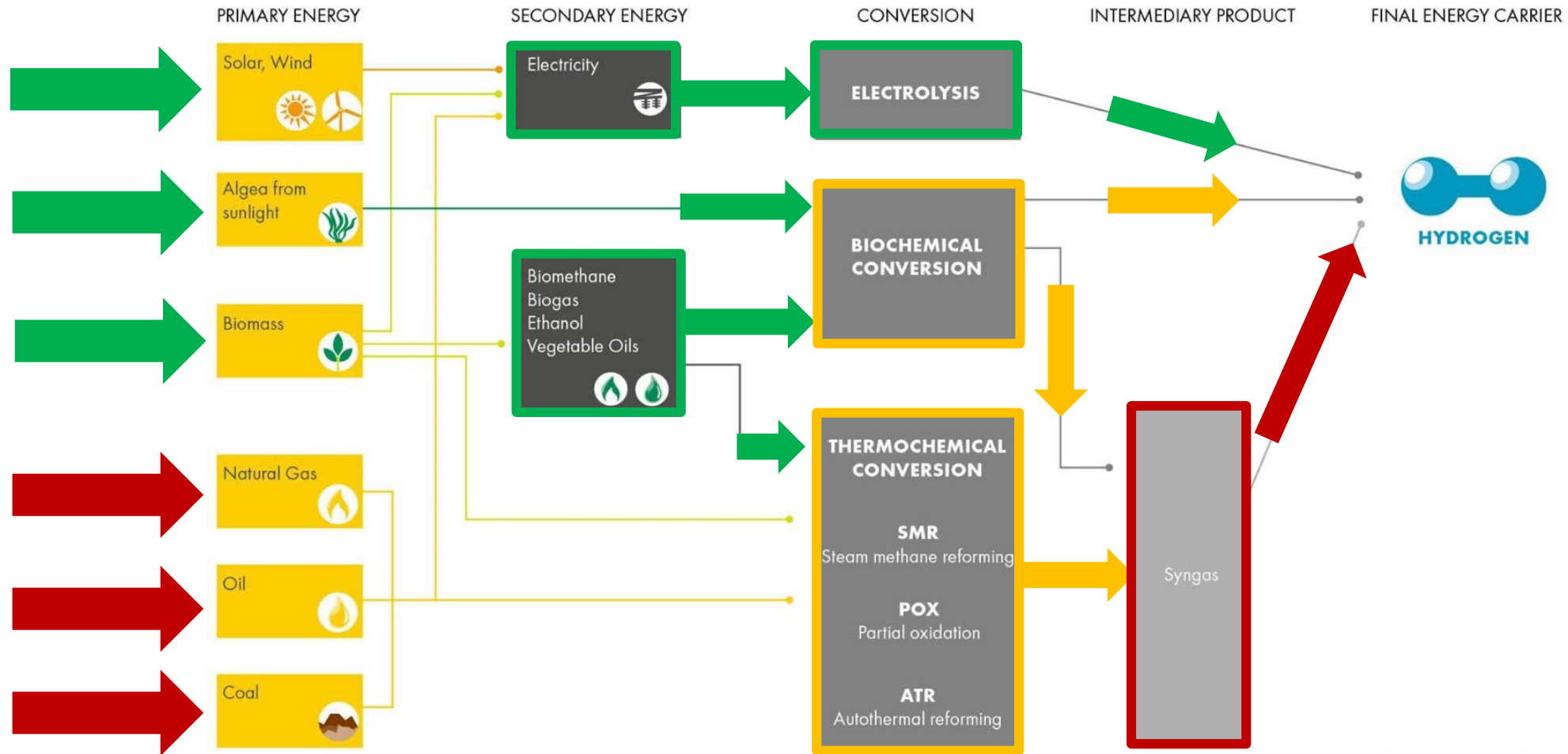
# Production d'hydrogène

- Les sources naturelles d'hydrogène à concentration exploitable sont très rares, mais existent (cf hydrogène naturel du bassin de Bourakébougou au Mali).
- Il faut donc **produire** le dihydrogène artificiellement, depuis d'autres molécules qui possèdent des atomes d'hydrogènes :
  - L'eau  $H_2O$
  - Le méthane  $CH_4$
  - La cellulose  $(C_6H_{10}O_5)_n$
  - etc
- L'hydrogène produit est donc un **vecteur énergétique** et non une source d'énergie.



# Production d'hydrogène

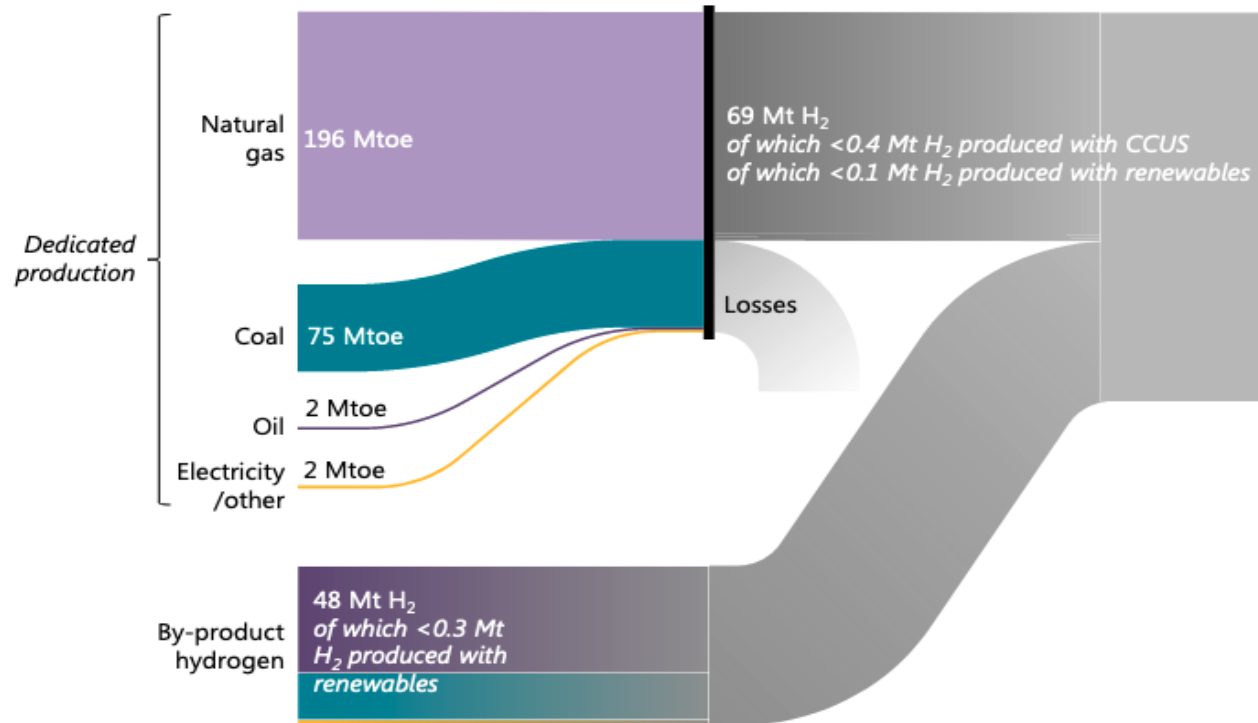
- Portrait global des moyens de production:



Shell Hydrogen Study © Shell

# Production d'hydrogène

- L'hydrogène est très principalement d'origine fossile aujourd'hui, et moins de 1% est renouvelable :



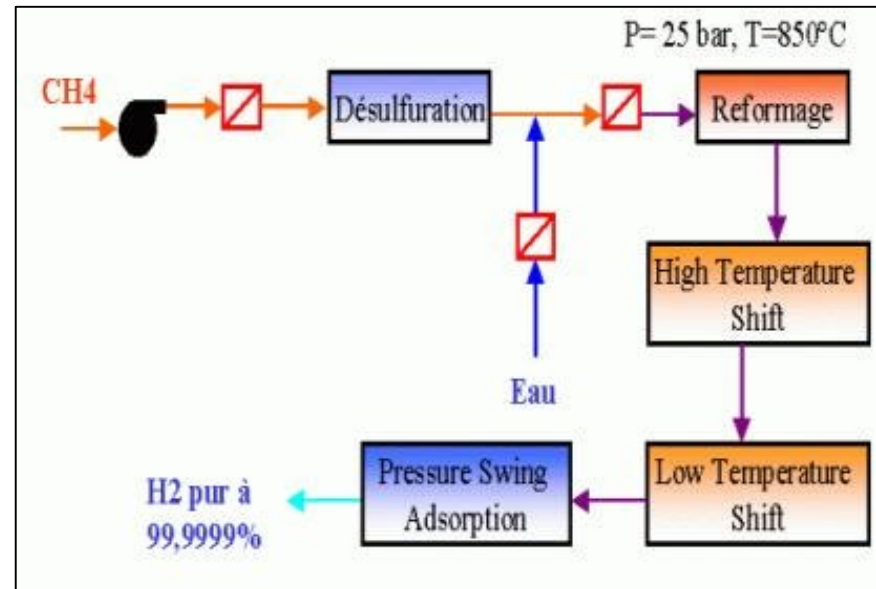
From: IEA – The future of hydrogen (2019)

Seulement 0,7% de la production d'hydrogène est faite à partir d'ENR ou d'énergie fossiles équipé de la technologie de captation de CO<sub>2</sub>.

Au total, la production d'hydrogène est responsable de 830 MtCO<sub>2</sub>/année.

# Production d'hydrogène

- L'immense majorité est synthétisé à l'aide d'un unique procédé :
  - **Vaporeformage** à partir d'hydrocarbure (92-96%)

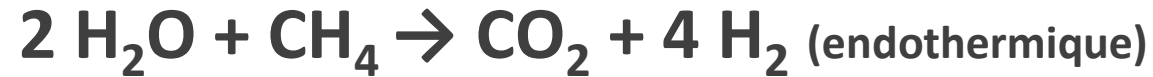


<http://h2petrole.free.fr/include/section4.html>

# Production d'hydrogène

- **Le vaporeformage :**

- Principe : Désulfuration des hydrocarbures (75% des cas méthane, 25% charbon) pour rompre les liaisons hydrogènes et récupérer le dihydrogène :



- Méthode de production la plus courante produisant actuellement **96%** de l'hydrogène
- Prix de l'ordre de 1,8 USD/kg
- **Polluant :**
  - **500 gCO<sub>2</sub>eq/kWh d'H<sub>2</sub> (ou 10t CO<sub>2</sub>eq/t)** si fait depuis méthane (en considérant un rendement de 60% de la pile à combustible)
  - À comparer avec charbon 820 gCO<sub>2</sub>eq/kWh et éolien 11 gCO<sub>2</sub>eq/kWh (moyennes du GIEC)

# Production d'hydrogène

- Cependant il existe différentes solutions alternatives renouvelables :
  - **Électrolyse de l'eau**
  - **Gazéification de biomasse**
  - **Dissociation thermochimique**

# Production d'hydrogène

- **Alternative renouvelable – l'électrolyse de l'eau :**

- La réaction d'électrolyse permet de créer de l'hydrogène **sans émission de gaz à effet de serre** :



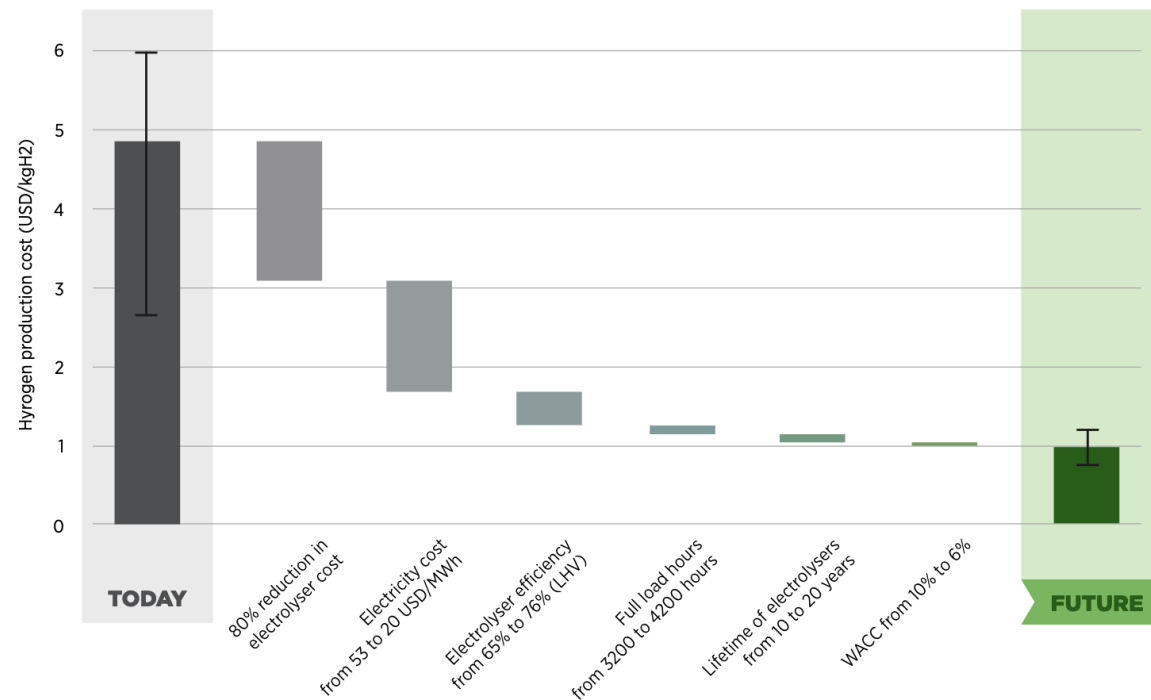
- Electrodes monopolaires connectées en parallèle remplacées par des électrodes bipolaires (une face anode et une face cathode) connectées en série.
- Prix de l'ordre de 7 USD/kg (4 x+\$ que le vaporeformage....)
- Non émetteur de GES **seulement** lorsque la source d'électricité est décarbonée. Produit un hydrogène « plus pur » destiné aux laboratoires de recherche et à l'industrie des semi-conducteurs, principalement.

# Production d'hydrogène

- **Alternative renouvelable – l'électrolyse de l'eau :**
  - 3 principales technologies d'électrolyse :
    - L'électrolyse alcaline
      - Forte inertie de la réaction -> besoin d'une source d'énergie stable
      - Meilleur rendement (60-70%) que le vaporeformage
    - L'électrolyse via Proton Exchange Membrane (PEM)
      - Prix plus élevé à cause de la membrane et des catalyseurs (métaux nobles)
      - Réactivité élevé -> adapté pour les sources intermittentes
    - L'électrolyse haute température (HTE)
      - Besoin d'une source de haute température décarbonée
      - Très bon rendement (90%)
  - Encore récemment aucune technologie ne tend à s'imposer mais avec le développement des ENR, la technologie PEM est sans doute celle qui sera la plus installée dans les prochaines années .

# Production d'hydrogène

## L'Électrolyse, un potentiel de réduction des coûts :

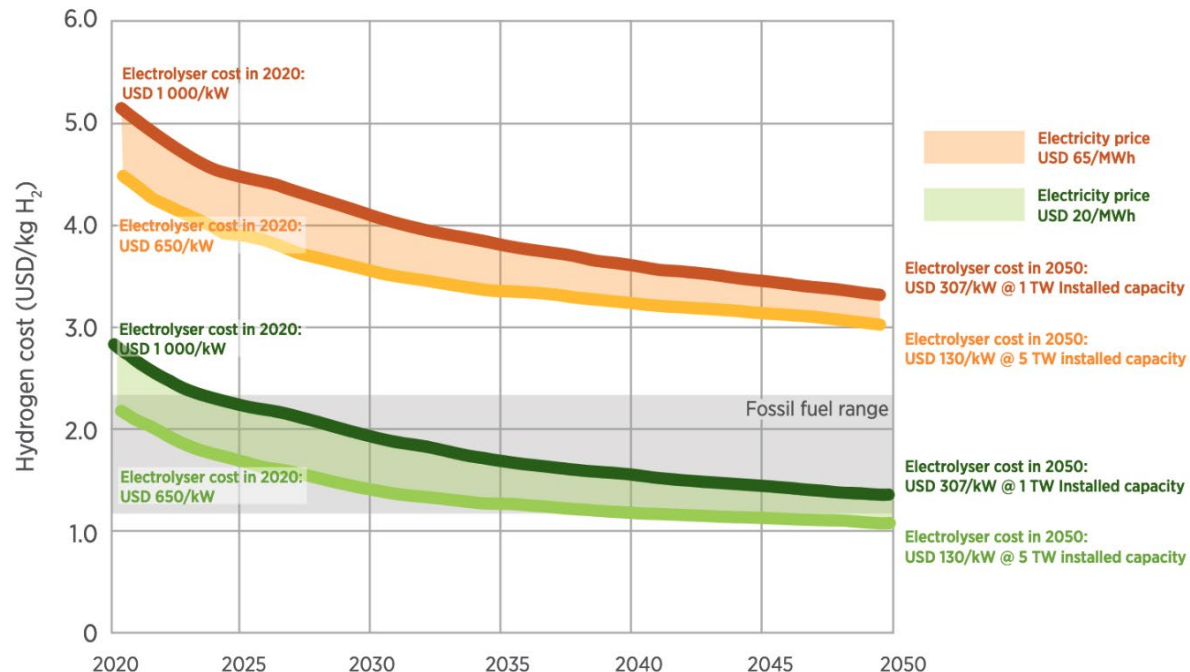


From: IRENA - Green Hydrogen Cost Reduction (2020)



# Production d'hydrogène

L'Électrolyse, un potentiel de réduction des coûts en fonction du prix de l'électricité :



From: IRENA - Green Hydrogen Cost Reduction (2020)

# Production d'hydrogène

## L'Électrolyse, un potentiel de performances :

	2020				2050			
	Alkaline	PEM	AEM	SOEC	Alkaline	PEM	AEM	SOEC
Cell pressure [bara]	< 30	< 70	< 35	< 10	> 70	> 70	> 70	> 20
Efficiency (system) [kWh/KgH <sub>2</sub> ]	50-78	50-83	57-69	45-55	< 45	< 45	< 45	< 40
Lifetime [thousand hours]	60	50-80	> 5	< 20	100	100-120	100	80
Capital costs estimate for large stacks (stack-only, > 1 MW) [USD/kW <sub>e</sub> ]	270	400	-	> 2 000	< 100	< 100	< 100	< 200
Capital cost range estimate for the entire system, >10 MW [USD/kW <sub>e</sub> ]	500-1000	700-1400	-	-	< 200	< 200	< 200	< 300

From: IRENA - Green Hydrogen Cost Reduction (2020)

# Production d'hydrogène

- **Alternative renouvelable – gazéification de biomasse :**

- Méthode de production en développement. Etape supplémentaire à des procédés de méthanisation ou de gazéification. Production de l'hydrogène à l'aide du syngas :



Ou également indépendamment d'autres procédés, en milieu alcalin :



- Technologie arrivant aux premiers tests commerciaux
  - <https://www.journaldequebec.com/2019/09/04/un-projet-de-13milliard-de-dollars>
  - <https://www.haffner-energy.com/>
- Projection d'un coût à 5 USD/kg :
  - Potentiel de 0,15 USD/kWh (avec rendement de la pile à combustible de 100%)
  - Environ 0,30 USD/kWh (avec rendement de la pile de 50%)

# Production d'hydrogène

- **Alternative renouvelable – dissociation thermochimique :**

- Méthode de production en développement. Nécessite une source à **très haute température (1000°C)** et des catalyseurs chimiques. Parmi les plus étudiés, il y a les catalyseurs Iode-Soufre, présents sous formes d'acides dans la réaction :



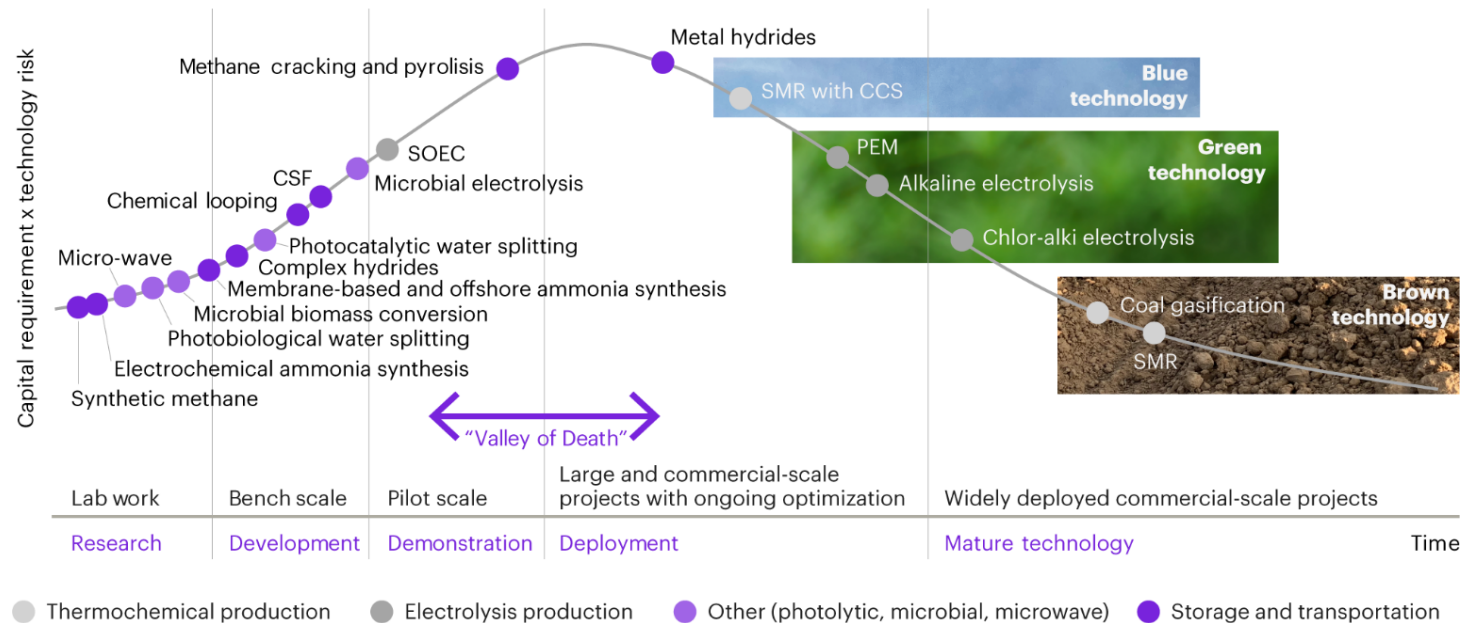
- Ici, la source de très haute température doit être décarbonée pour être intéressante. Seules les nouvelles générations de nucléaire ou le solaire à concentration permettent d'atteindre de telles températures.
- Prototypes en développement aux USA, en Chine et au Japon, notamment.

# Production d'hydrogène

- Portrait global des moyens de production:

Figure 3  
**Hydrogen technologies are rapidly maturing**

Maturity curve of key hydrogen technologies

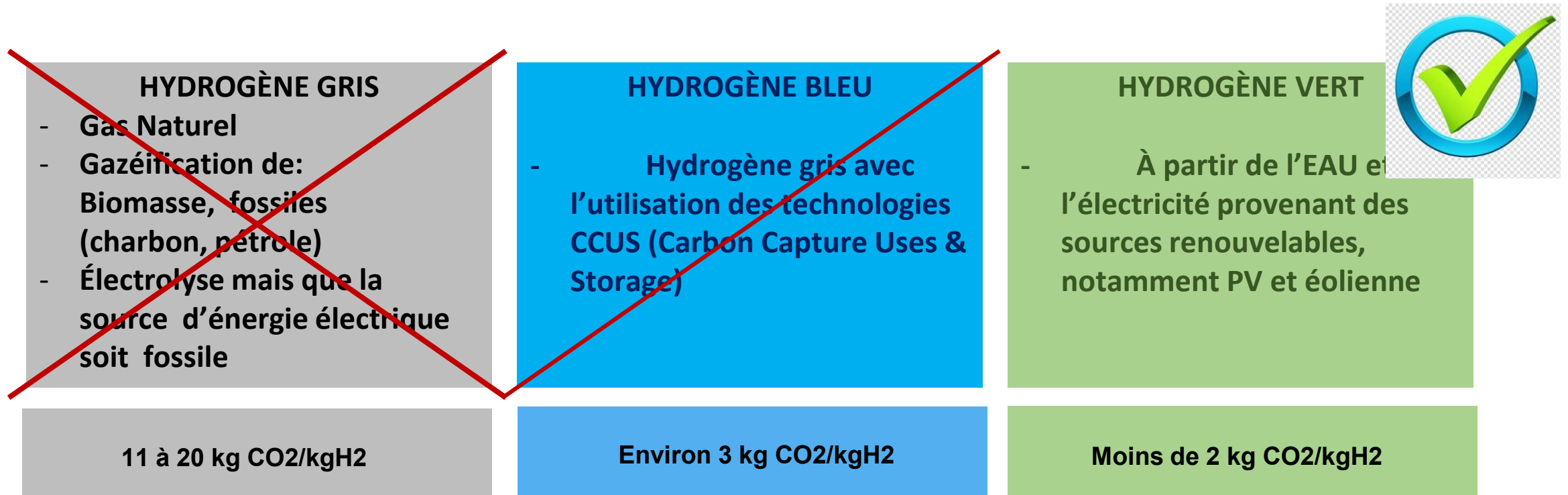


Notes: SMR is steam methane reforming; CCS is carbon capture storage; SOEC is solid oxide electrolyzer cell; CSF is concentration solar fuels. Sources: "The Future of Hydrogen," International Energy Agency, June 2019; "National Hydrogen Roadmap," Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, 2018; "Hydrogen from Renewable Power," International Renewable Energy Agency, 2015; Kearney Energy Transition Institute analysis

<https://www.energy-transition-institute.com/fr/insights/hydrogen>

# Production d'hydrogène

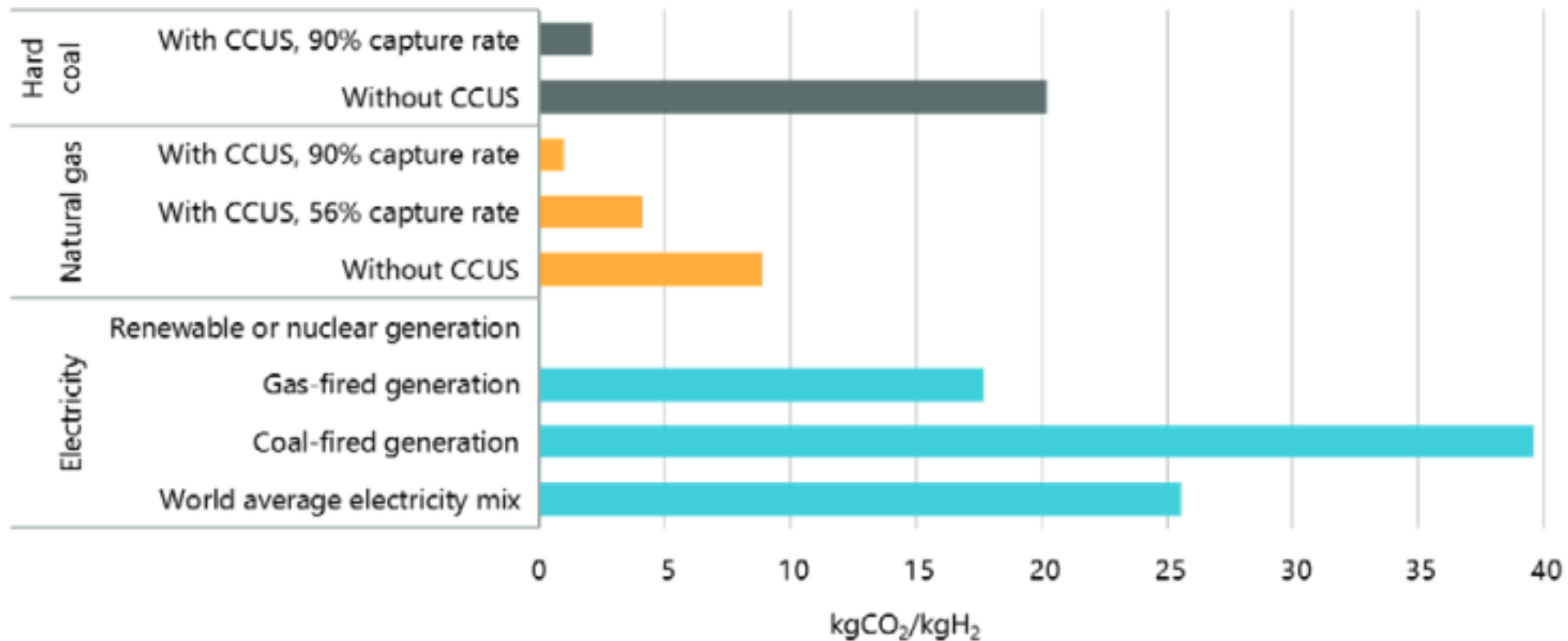
- Type d'hydrogène actuellement sur le marché



D'après l'ADEME, méthode de calcul des émissions qui prend l'ensemble des scopes du bilan carbone.

# Production d'hydrogène

- Type d'hydrogène actuellement sur le marché



From: IEA – The future of hydrogen (2019)

# Production d'hydrogène

- Procédés avec dérivés du carbone à haute valeur ajoutée (H<sub>2</sub>+C)
  - **La décomposition thermo catalytique** : une des premières technologies de craquage thermique du méthane est le procédé de Wulff. Ce procédé utilise de la vapeur à haute température pour fissurer le gaz naturel en acétylène, produisant principalement du dihydrogène, de l'acétylène, de l'éthylène, des oxydes de carbone dans le flux gazeux, et du carbone solide déposé sur le support.
  - D'autres procédés, principalement basés sur la pyrolyse du méthane, ont ensuite été étudiés et ont atteint différents stades de développement. On peut notamment citer le procédé de pyrolyse du méthane dans un bain de métal fondu, qui utilise une colonne à bulles remplie d'un métal sous forme liquide. Le méthane y est introduit par un pulvérisateur et se décompose lors de la remontée des bulles. Du noir de carbone se forme alors au sommet de la colonne et le dihydrogène est évacué par le haut.



# Production d'hydrogène

- Procédés avec dérivés du carbone à haute valeur ajoutée (H<sub>2</sub>+C)
  - **La décomposition directe du méthane** pour la co-production de dihydrogène et de noir de carbone, qui peut se faire par craquage grâce à une torche à plasma thermique. On obtient alors du carbone, généralement sous forme de noir de carbone, et du dihydrogène. Différentes technologies existent : plasma à courant continu (procédé de Kvaerner), plasma à courant alternatif triphasé (technologie développée aux Mines ParisTech et utilisée par Monolith Materials et Plenesys). Il existe également des procédés qui utilisent des torches à plasma non thermique (plasma froid), comme des torches à plasma à micro-ondes.

# Production d'hydrogène

- Procédés avec dérivés du carbone à haute valeur ajoutée (H<sub>2</sub>+C)
  - **La décomposition chimique du méthane** : ce procédé est basé sur la réaction d'hydrocarbures, tels que le méthane, avec du chlorure de nickel anhydre pour former du nickel métallique, du carbone et du chlorure d'hydrogène à une température d'environ 800°C. L'abaissement de la température entraîne une réaction inverse entre le nickel métallique et le chlorure de d'hydrogène pour régénérer le chlorure de nickel et libérer du dihydrogène. Le carbone est séparé du chlorure de nickel par sublimation. La réaction est tolérante aux impuretés présentes dans le gaz naturel, comme le soufre, l'eau et d'autres hydrocarbures.

# Production d'hydrogène

- Procédés avec dérivés du carbone à haute valeur ajoutée (H<sub>2</sub>+C)
  - Enfin, **l'énergie solaire concentrée** est également étudiée pour cet usage. En effet, il s'agit d'une source renouvelable de chaleur à haute température, et l'irradiation solaire directe des réactifs permet un transfert de chaleur très efficace.

## Sources :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Production\\_d%27hydrog%C3%A8ne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Production_d%27hydrog%C3%A8ne)  
<https://fuelcellworks.com/news/hydrogen-from-natural-gas-without-co2-emissions/>  
<http://www.fulcheri.fr/>

# Production d'hydrogène

- Procédés avec dérivés du carbone à haute valeur ajoutée (H2+C)
  - Quelques entreprises et universités/laboratoires associés



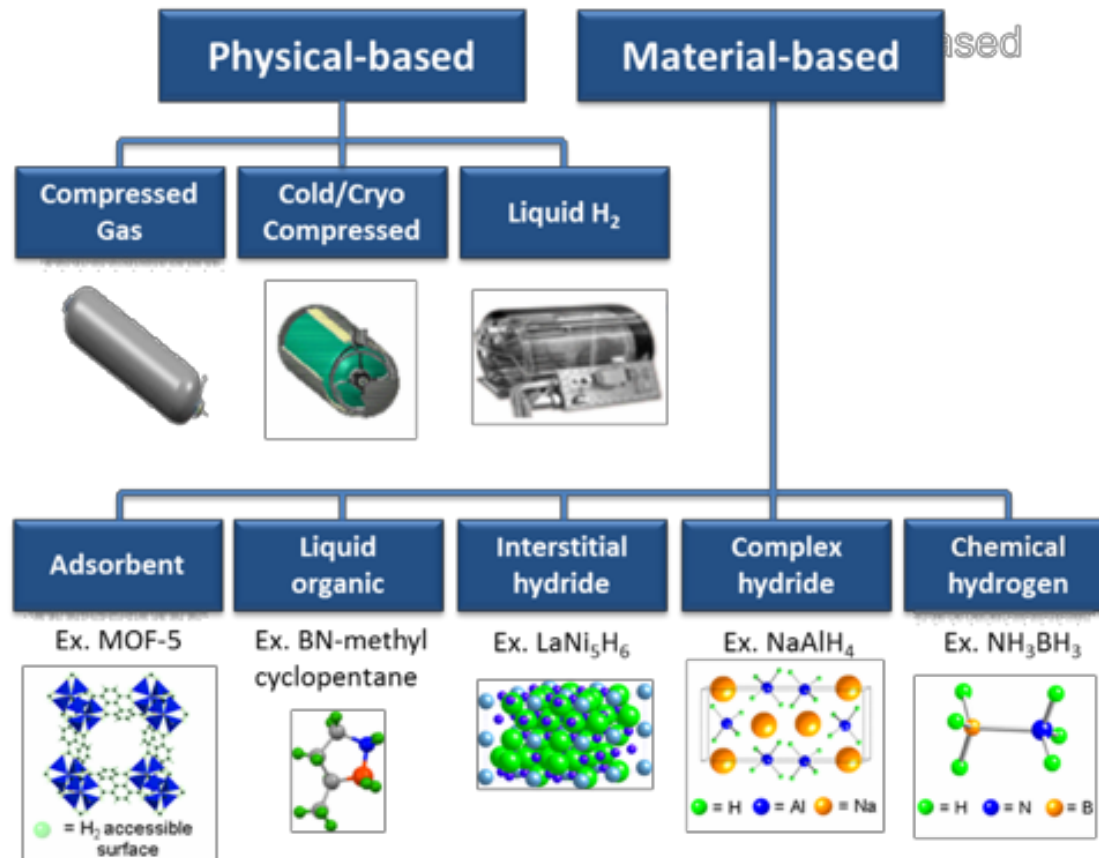
Source : Ott, M., 2021, La production d'hydrogène H2+C, disponible sur Moodle

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Production
- ***Stockage***
- Transport et distribution
- Utilisations
- Conclusion

# Stockage

## How is hydrogen stored?



Source: [hydrogen Europe](#)

Gaz comprimé:

\*P=200 Bar pour des applications industrielles et P=350 à 700 Bar pour des applications mobiles.

Gaz froid comprimé:

\*Pour obtenir une plus grande densité énergétique.

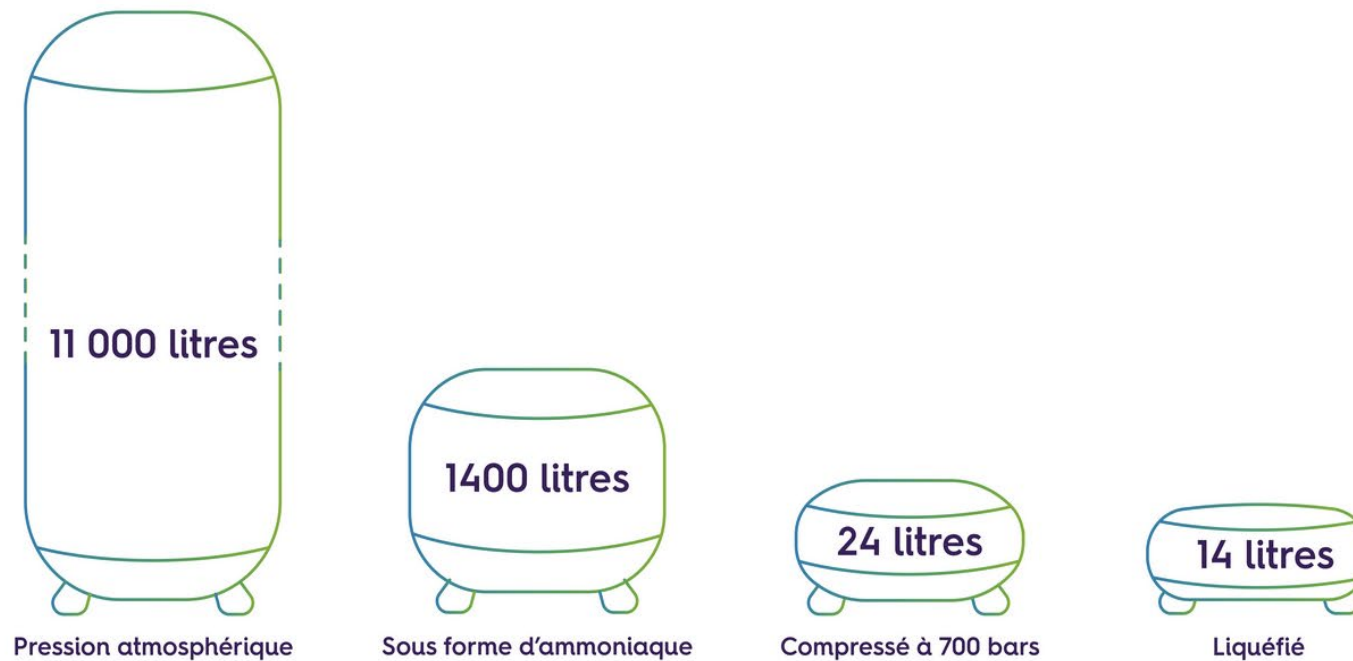
LH<sub>2</sub> – Liquified Hydrogen Gas:

\* Plus grande densité énergétique à T=-253°C. Très coûteux.

# Stockage

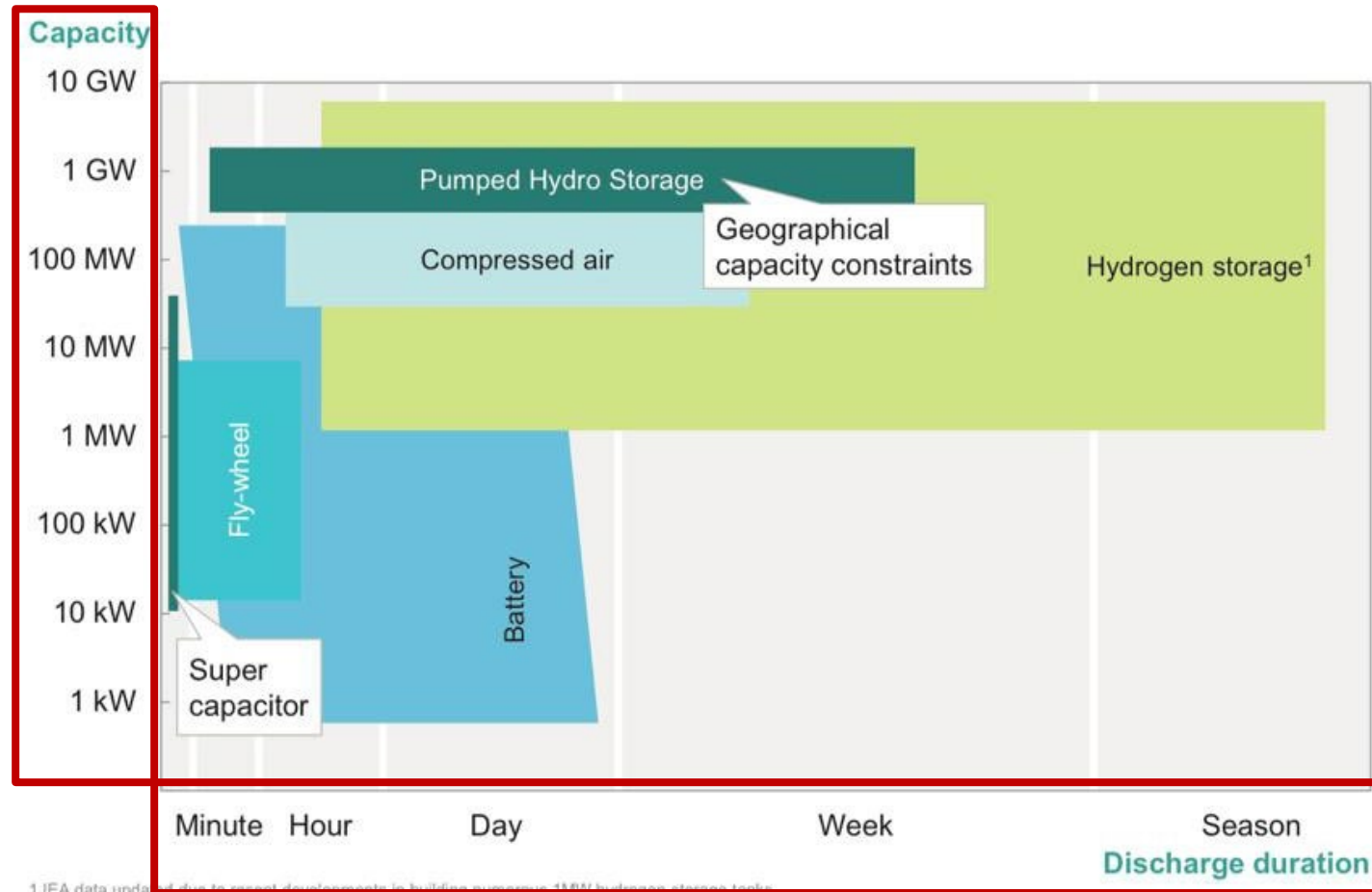
- Un compromis entre énergie volumique, coûts et énergie dépensée pour le stockage

## Volume de stockage pour 1 kg d'hydrogène



# Stockage

- Différentes options de stockage : capacité vs temps de décharge



<sup>1</sup> IEA data updated due to recent developments in building numerous 1000+ hydrogen storage tanks

Source: IEA Energy Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells, JRC Scientific and Policy Report 2013



# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Production
- Stockage
- ***Transport et distribution***
- Utilisations
- Conclusion

# Transport et distribution

- Pipeplines



[Gulf Coast Hydrogen Pipeline System - Advantage: Air Products – États](#)

Unis [Air Liquide Arabia hydrogen pipeline network in Jubail, Saudi Arabia](#)



Figure 1 - Réseaux de pipelines hydrogène d'Air Liquide du Nord de l'Europe

[Source: AFHYPAC](#)

[\\*\\* Energy transition with green hydrogen GET-H2 Allemagne](#)

# Transport et distribution

- Transport maritime

## ENERGY

### World's first liquid hydrogen carrier ship launches in Japan

Kawasaki Heavy's vessel will transport the next-generation fuel from Australia



The Suiso Frontier, the world's first liquid hydrogen carrier, is unveiled Wednesday at a port in Kobe, Japan. (Photo by Maho Obata)

MASAMICHI HOSHI, Nikkei staff writer  
December 12, 2019 06:40 JST

[Suiso-Frontier by Kawasaki | Motori360](#)

# Transport et distribution

- Transport routier



Forme liquide à -  
253°C



Forme gazeuse à 240  
Bar

TUBE TRAILER CYLINDERS AT 2,400 PSI  
SPECIAL PERMITTED AT 6,000 PSI OR MORE

Hydrogen Safety: Transport

# Transport et distribution

- Distribution



[Toyota Mirai: Hydrogen Refueling Explained | Toyota](#)

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Production
- Stockage
- Transport et distribution
- ***Utilisations***
  - ***Actuelles***
  - ***Potentielles***
- Conclusion

# Utilisations actuelles

- Aujourd'hui :
  - Synthèse de l'ammoniac : 45-50 % du marché (i.e. sur les 69Mt H<sub>2</sub>)
    - agriculture et industrie chimique
  - Raffinage et désulfuration des hydrocarbures : 37-45 %
    - pétrochimie
  - Autres: 10-12 %
    - méthanol pour industrie chimique, métallurgie, électronique, ...
  - Vecteur énergétique : environ 0%

# Question

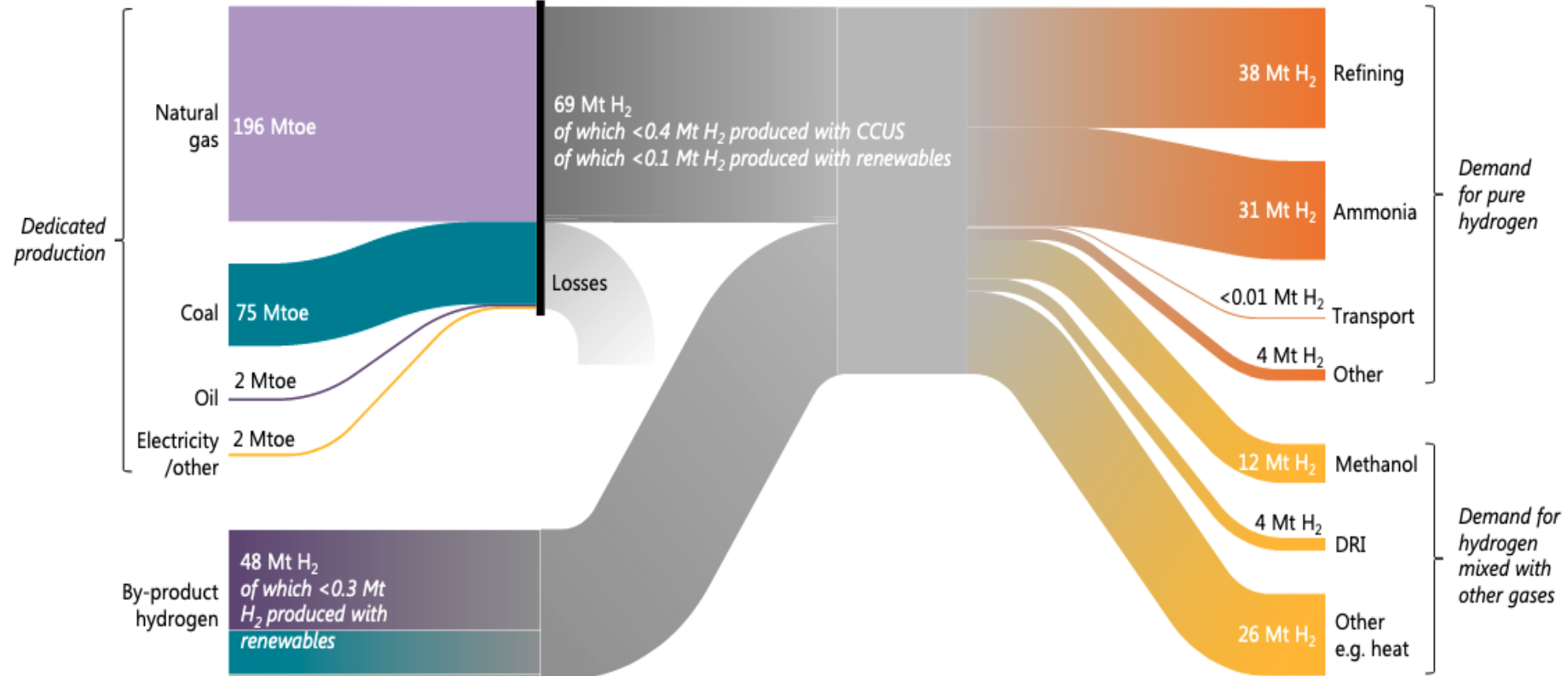
- Comment peut-on convertir du dihydrogène en électricité ?
  - A. Avec un compresseur
  - B. Avec un électrolyseur
  - C. Avec une pile à combustible
  - D. Avec une turbine asynchrone
  - E. Aucune de ces réponses



ENR2020



# Utilisations actuelles



From: IEA – The future of hydrogen (2019)

# Utilisations actuelles

- Applications portables



[Horizon MiniPak](#)

[Horizon's MiniPak - compact fuel cell power supply](#)



[Upp hydrogen-powered portable charger](#)

[Upp personal hydrogen fuel cell hands-on](#)



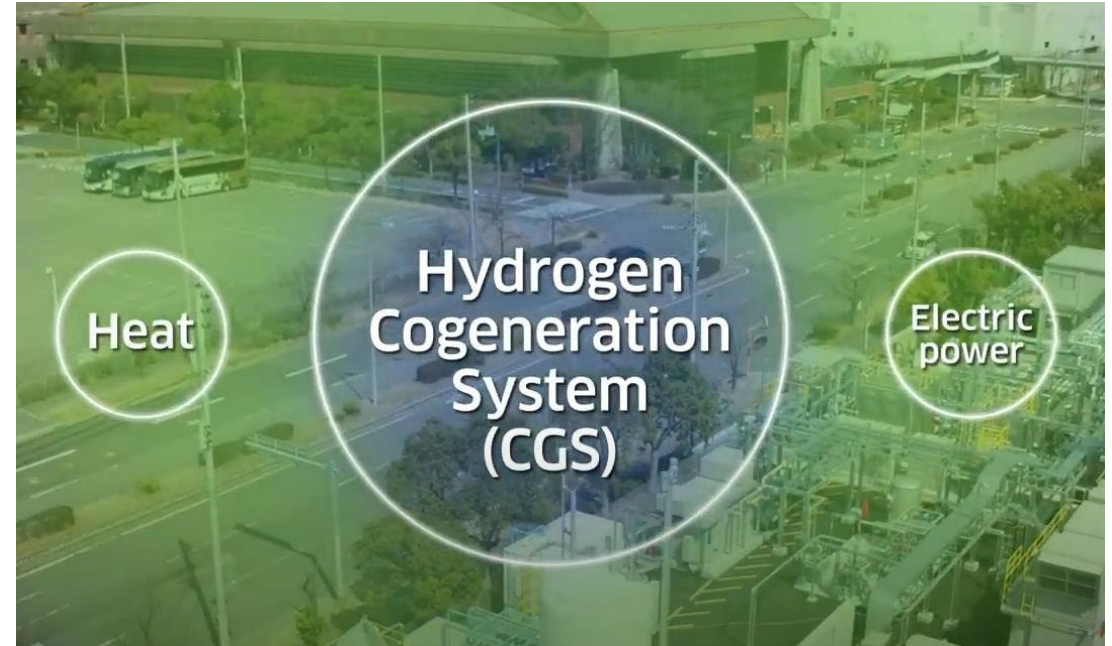
[Brunton Portable Power Units](#)

# Utilisations actuelles

- Applications stationnaires



2013 – Centrale de production d'hydrogène et de chaleur avec une capacité de 59 MW [GYEONGGI Hydrogen Power Plant – South Korea](#)



2017 – Centrale de Cogénération de Chaleur et Puissance à Kobe, Japon [Kawasaki: Hydrogen CGS for Smart Community at Kobe, Japan](#)

# Utilisations actuelles

- Applications stationnaires



**2019** - Energy Observer s'est posé au Champ-de-Mars à Paris pour parler Hydrogène, mobilités et transports d'aujourd'hui et de demain.

<https://www.leparisien.fr/info-paris-ile-de-france-oise/transports/transition-energetique-un-son-et-lumiere-sur-la-tour-eiffel-eclairee-grace-a-lhydrogene-23-05-2021-SD3IQYRAPNB6PN53DH2RZCTSNO.php>

# Utilisations actuelles

- Applications industrielles

The use of hydrogen is not new; private industry has used it safely for many decades. Nine million tons of hydrogen are safely produced and used in the United States every year. 56 billion kg/yr are produced globally. For example, H<sub>2</sub> is used for:

- Petroleum refining
- Glass purification
- Aerospace applications
- Fertilizers
- Annealing and heat treating metals
- Pharmaceutical products



The Air Products and Chemicals hydrogen production facilities in Port Arthur, Texas, is funded by the Energy Department through the 2009 Recovery Act. | Photo credit Air Products and Chemicals hydrogen production facilities.

- Petrochemical manufacturing
- Semiconductor industry
- Hydrogenation of unsaturated fatty acids in vegetable oil
- Welding
- Coolant in power generators

[Webinar for Code Officials on Hydrogen and Fuel Cells](#)

# Utilisations actuelles

- Applications mobiles



Toyota  
Mirai



Hyundai  
Nexo



## PRODUCTS



NIKOLA ONE



NIKOLA TWO



NIKOLA TRE



NIKOLA BADGER

Nikola  
Motors



Honda Clarity

# Activité

- Véhicule à hydrogène
  - Durée : 20 minutes
    - Travail personnel : 5 minutes (formulation d'une réponse écrite)
    - Travail en 3 équipes : 10 minutes (formulation d'une réponse écrite)
    - Plénière et synthèse: 5 minutes (présentation des solutions par équipes)

# Activité



Vraiment?

- Véhicule à hydrogène

- Toyota Mirai :

- En supposant qu'il faut 15kWh pour faire 100km en voiture, combien de litres de H<sub>2</sub> compressé à 700bar est nécessaire pour avoir une autonomie de 500km? Combien de litres de pétrole pour faire la même chose?
  - On suppose d'abord un rendement énergétique du moteur de 100%
  - On suppose ensuite un rendement du moteur thermique de 25% et un rendement moteur électrique-PàC de 50%.
- Refaire le calcul avec la masse nécessaire.
- Quel devrait être le prix du kg de H<sub>2</sub> à la pompe pour concurrencer un pétrole à 1,2\$ le litre?

Données :

H<sub>2</sub> (700bar) : 4,5MJ/L – 120MJ/kg

Essence : 34MJ/L – 42MJ/kg



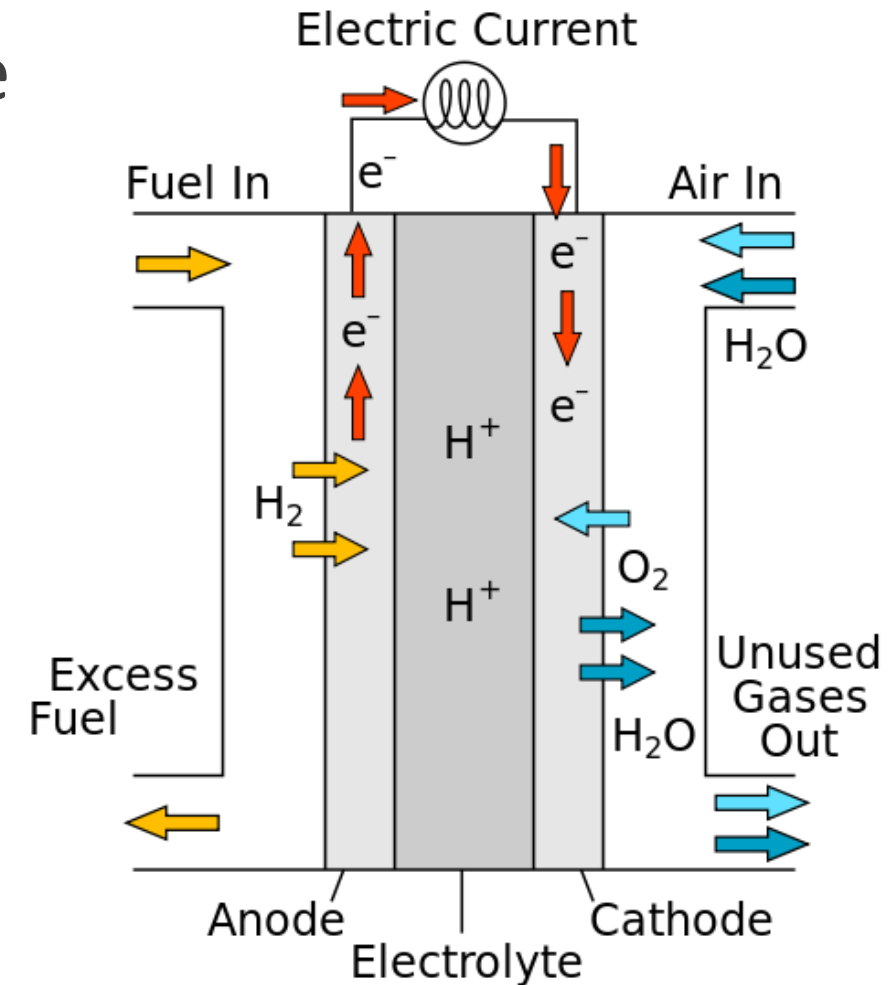
# Utilisations potentielles

- Production d'électricité - Pile à combustible

- Réaction d'oxydoréduction d'un combustible réducteur ( $H_2$ ) et d'un oxydant ( $O_2$ ) :

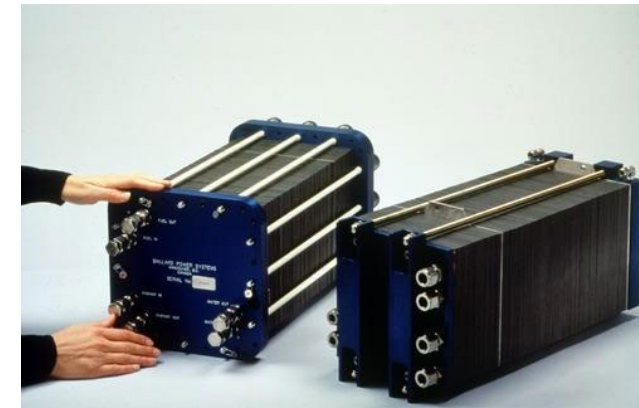


- Libération des électrons qui vont créer un courant électrique donc produire de l'électricité + Production de vapeur d'eau  $H_2O$



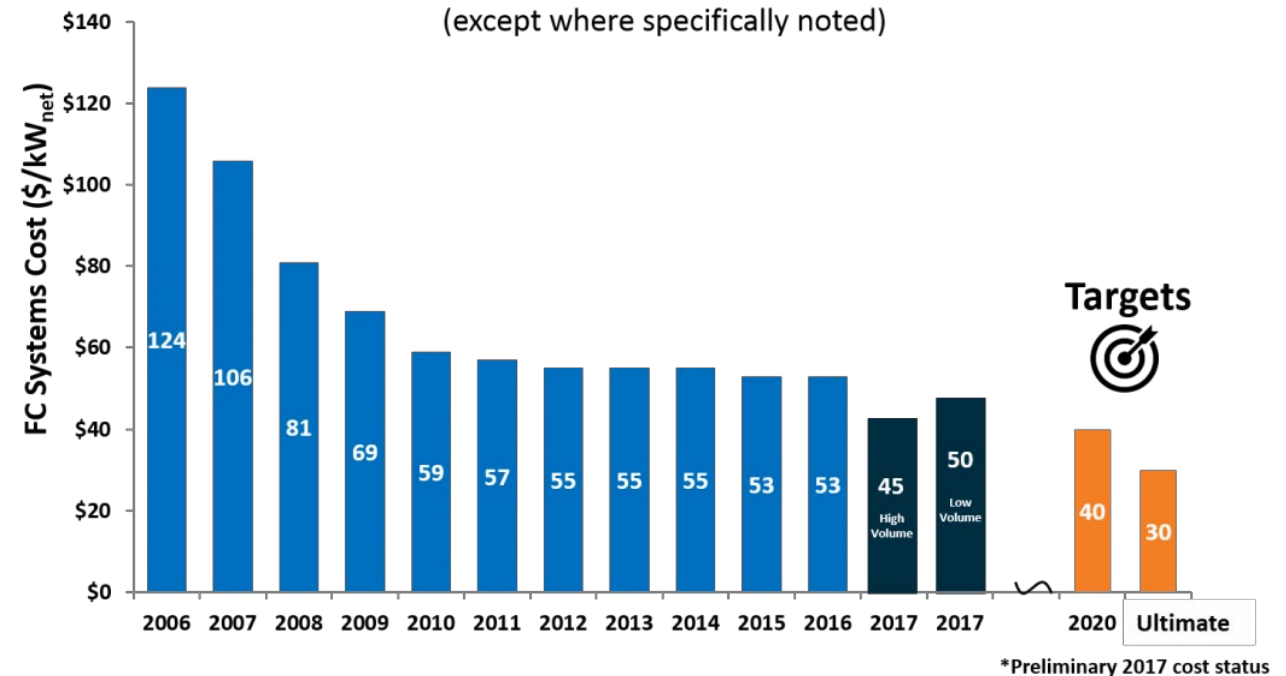
# Utilisations potentielles

- Production d'électricité - PàC
  - Encore assez chère, notamment à cause de l'importante utilisation de platine.
  - Rendement assez élevé d'environ 40 à 60% (bien mieux que moteur thermique à 25-30% environ).



**Modeled Cost of Fuel Cell System Over Time**

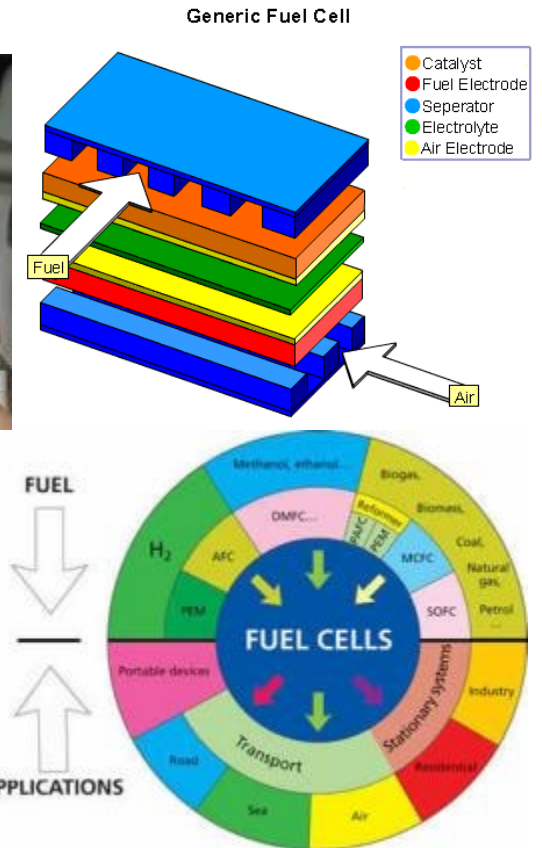
80-kW<sub>net</sub> PEM fuel cell system projected to high-volume\* manufacturing (except where specifically noted)



Source: [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/17007\\_fuel\\_cell\\_system\\_cost\\_2017.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/17007_fuel_cell_system_cost_2017.pdf)

# Utilisations potentielles

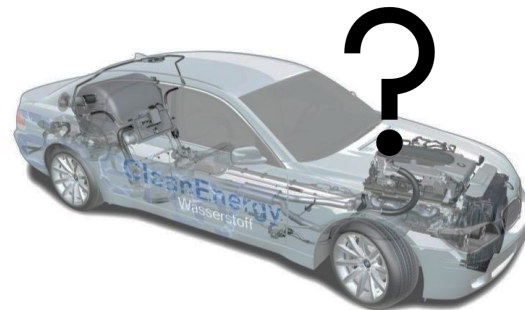
- Production d'électricité – PàC :  
Recherche au Québec
  - Institut d'Innovation en Piles à Combustibles
  - Groupe UQAM
  - L'institut de l'hydrogène de l'UQTR
    - propose les recherches les plus conséquentes au Québec sur le sujet
    - pilote un projet de regroupement scientifique



# Utilisations potentielles

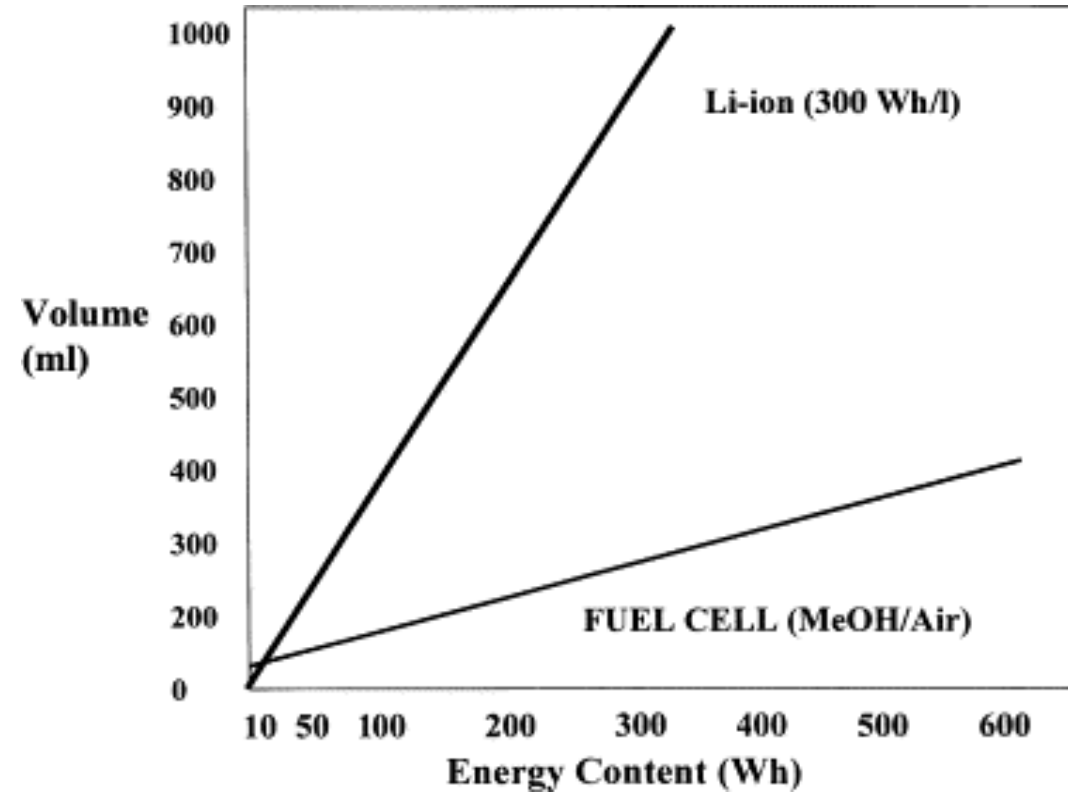
- Production d'électricité – motorisation électrique :
  - Permettrait de devenir un carburant propre pour les transports;
  - Intéressant pour les trains, les camions et le trafic maritime;
  - Potentiel dans les véhicules personnels? Oui, mais dépend fortement de son concurrent Lithium-ion.

(point de vue : <https://www.connaissancedesenergies.org/tribune-actualite-energies/le-duel-batteries-hydrogene-pour-la-motorisation-decarbonee-du-transport-routier>)



# Utilisations potentielles

- Production d'électricité – motorisation électrique :
  - Comparaison avec technologie lithium-ion :
    - Environ 3 kW/kg ( $H_2$ ) vs 0,25kW/kg (Li-ion) pour système de 100kW



Taken from : C.K.Dyer - "Fuel cells for portable applications" – 2002 – Journal of power source

# Utilisations potentielles

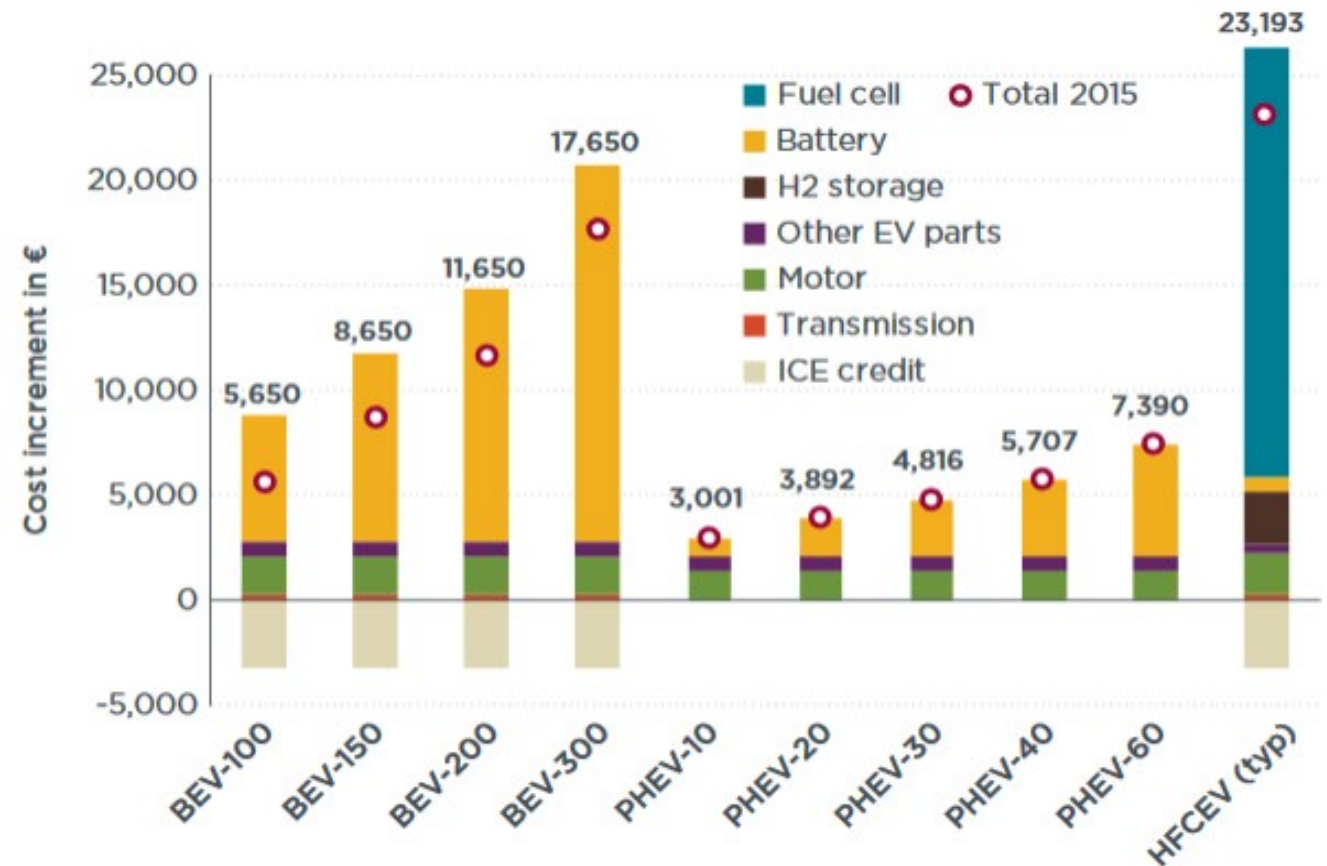
- Production d'électricité – motorisation électrique :
  - Comparaison avec technologie lithium-ion :
    - Coût des technologies hydrogènes supérieur

## Légende:

HFCEV: Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle

BEV: Battery EV

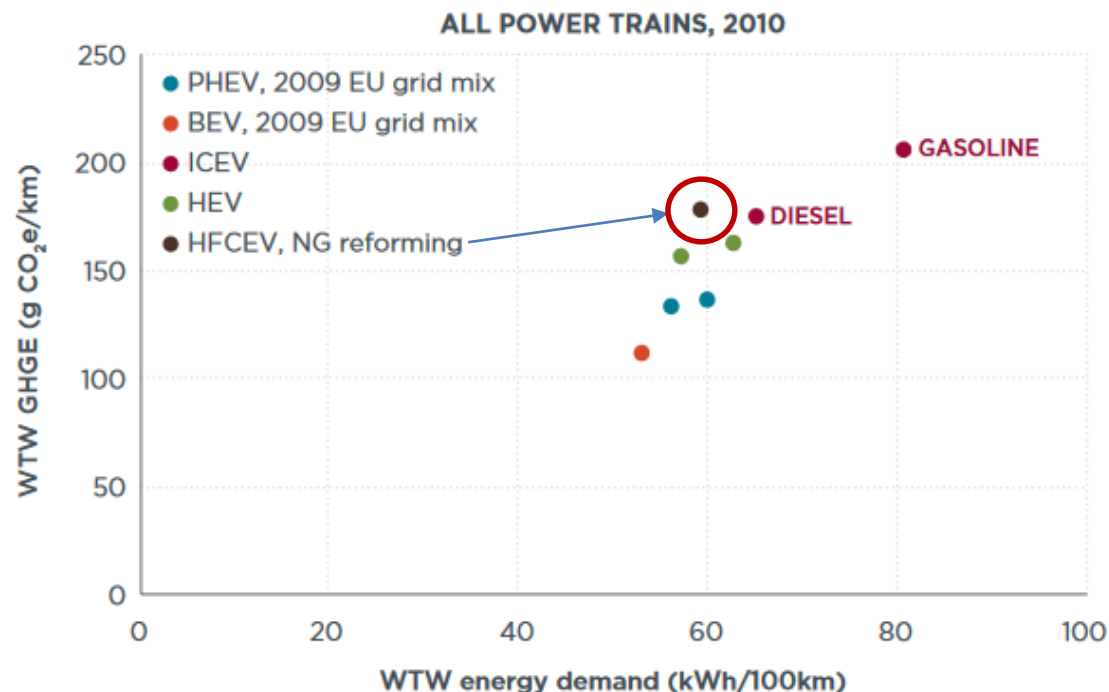
PHEV: Plug-in Hybrid EV



Paul Wolfram and Nic Lutsey – “Electric vehicles: Literature review of technology costs and carbon emissions” – 2016 – International council on clean transportation

# Utilisations potentielles

- Production d'électricité – motorisation électrique :
  - Mais la priorité est toujours à la décarbonation de l'hydrogène :



**Figure 2.** WTW greenhouse gas emissions (GHGE) and energy demand of 2010 passenger cars using different energy sources. For ICEVs, HEVs, and PHEVs, the higher estimate is for gasoline, and the lower one is for diesel.

## Légende:

HFCEV: Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle

BEV: Battery EV

PHEV: Plug-in Hybrid EV

Paul Wolfram and Nic Lutsey – “Electric vehicles: Literature review of technology costs and carbon emissions” – 2016 – International council on clean transportation

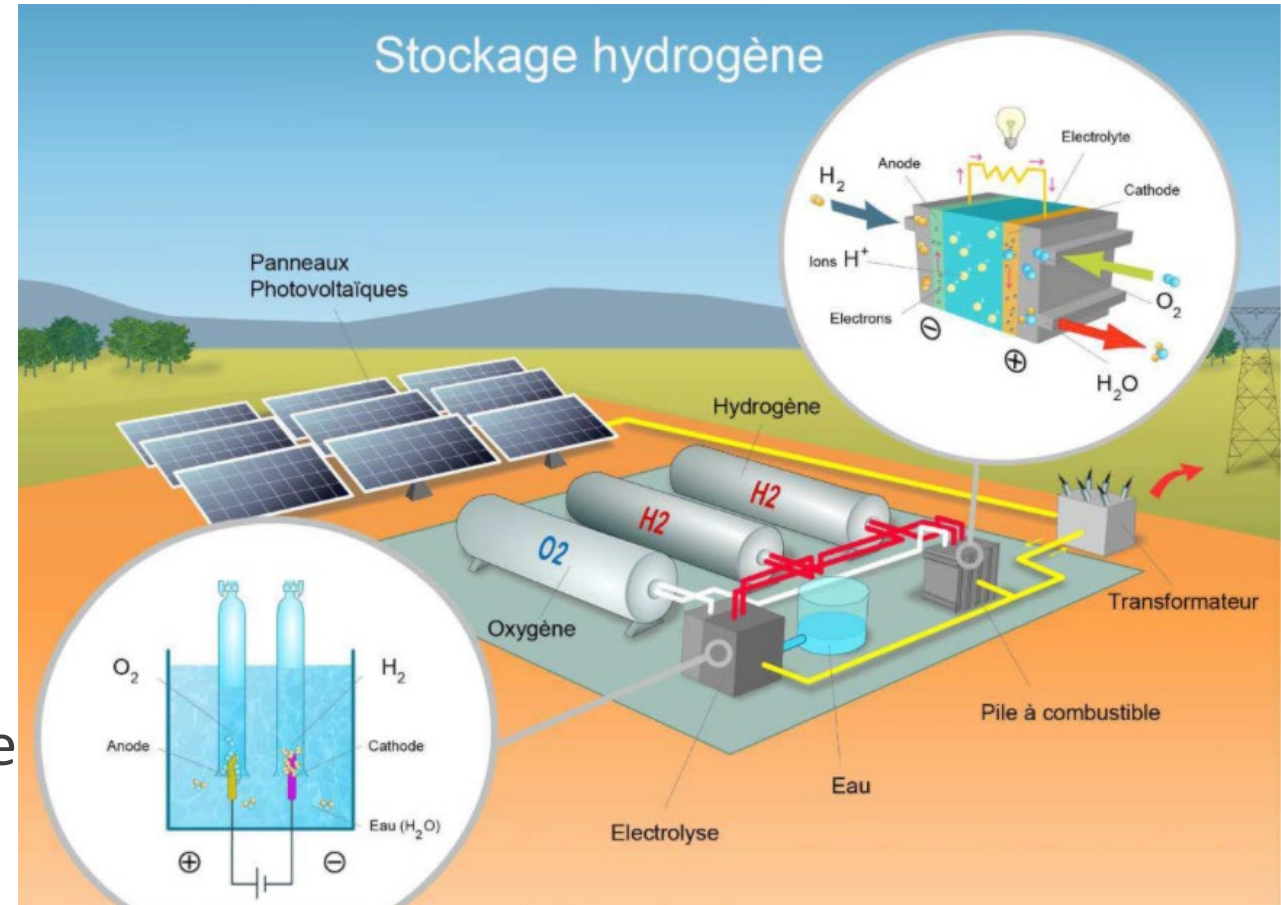
# Utilisations potentielles

- Complément dans les réseaux de gaz naturel
  - Principe : Remplacer une part du gaz naturel par de l'hydrogène qui n'émet pas de CO<sub>2</sub>, contrairement au gaz naturel ;
  - Certains réseaux de gaz de ville peuvent déjà légalement accepter jusqu'à 10 % d'H<sub>2</sub> ;
  - Limite haute acceptable de 20 % sur les réseaux existants (d'après un rapport de la commission européenne datant de 2006);
  - H<sub>2</sub> peut aussi être facilement transformé en méthane pour mieux s'adapter aux technologies existantes.



# Utilisations potentielles

- Stockage et Production d'électricité sur réseau :
  - Processus en 3 étapes :
    - Production d'hydrogène grâce à la décomposition de l'eau par électrolyse
    - Compression de l'hydrogène
    - Utilisation d'une pile à combustible (réaction inverse de l'électrolyse) pour produire de l'électricité



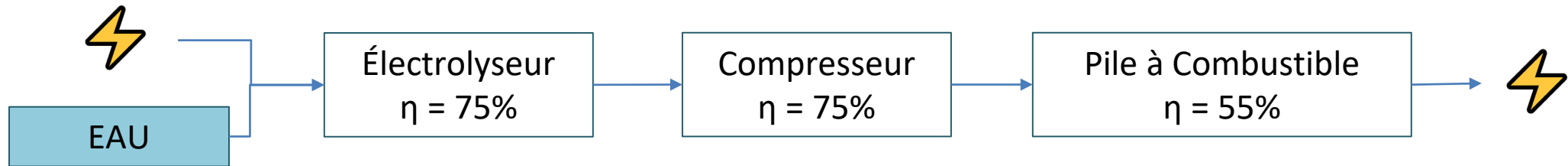
<http://sitelyceejdar.org/autodoc/cours/001%201%20STI2D/Technologie%20transversale/StockageEnergie/index.html?Stockageainductancesupraconductr.html>

# Utilisations potentielles

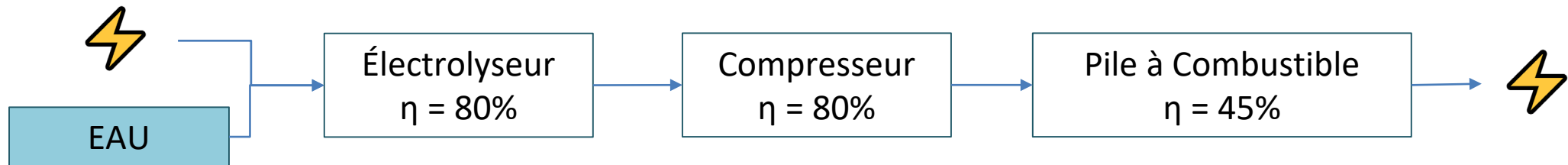
- Stockage et Production d'électricité sur réseau :
  - Rendement total encore faible. Meilleurs rendements de 50-60 %  
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fuel-cell-efficiency>  
[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/fcto\\_fuel\\_cells\\_fact\\_sheet.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/fcto_fuel_cells_fact_sheet.pdf)
  - Inférieur aux STEP ou aux batteries ( $\eta \approx 80\%$ )

# Utilisations potentielles

- Stockage et Production d'électricité sur réseau :



Rendement total :  $\eta \approx 33\%$



Rendement total :  $\eta \approx 28\%$

Jean-Marc Jancovici.

**Il faut retenir un rendement voisin de 30%**

# Utilisations potentielles

- Stockage et Production d'électricité sur réseau :
  - Permettrait de faire du lissage de production d'énergies renouvelables
  - Cependant, encore peu concurrentiel en termes de coûts, CAPEX et OPEX

	STEP	CAES	Hydrogène	Batterie NaS	Batterie Li-ion	Batterie Redox-Flow	Volant d'inertie	SMES
Coût d'investissement par unité de puissance (€/kW)	500 – 1500	700 – 1000	6000	1000 – 2500	600 – 1500	1000 – 3000	150 – 3000	100 – 500

Tableau comparatifs des coûts des solutions de stockage stationnaire – dossier « le stockage stationnaire de l'énergie », CEA, 2012

# Utilisations potentielles

- Stockage par des « Hydrures » :
  - Axe de recherche actuel du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives)
  - Un **Hydrures métalliques** (Alliage nickel, titane, magnésium) absorbe naturellement l'hydrogène gazeux pour former une nouvelle phase du matériau puis le désorbe de manière réversible en diminuant la pression
  - Première démonstrations pré-industrielles : cartouche de 15kg, soit l'équivalent de 500 kWh avec un rendement de 97% (hydrogène à 300°C sous 10 bars)

# Utilisations potentielles

- Stockage par des « Hydrures » :
  - Avantages :
    - Hydrogène accède au matériau de manière uniforme
    - **Forte densité volumique d'énergie (0,25 L/kWh)** ? la porosité constitue un tampon qui permet d'éviter le gonflement de la matière
    - Evite le coût énergétique de compression du gaz lors du stockage
    - Très bon rendement
  - Désavantages :
    - **Très faible densité massique** puisqu'au bilan il faut ajouter le poids du matériaux dans lequel l'hydrogène s'insère
    - Encore très peu concurrentiel : 12 \$/kWh



CEA, Le stockage stationnaire de l'énergie, 2012

# Utilisations potentielles

- Les défis de l'heure
  - Le stockage (volume, résistance chimique des matériaux);
  - Oxydation partielle (perte de charge);
  - Passage à un hydrogène d'origine renouvelable;
  - Diminution des coûts (d'après IEA projection de -30% pour 2030, mais encore insuffisant);
  - Adaptation des réglementations de sécurité (cf HyLaw project).

# Question

- L'hydrogène de demain permet de :
  - A. Faire du stockage d'énergie sur réseau d'électricité
  - B. Augmenter les fluctuations sur les réseaux électriques
  - C. Réduire l'empreinte carbone des engrais et de l'industrie chimique
  - D. Dépolluer une partie des transports
  - E. Aucune de ces réponses

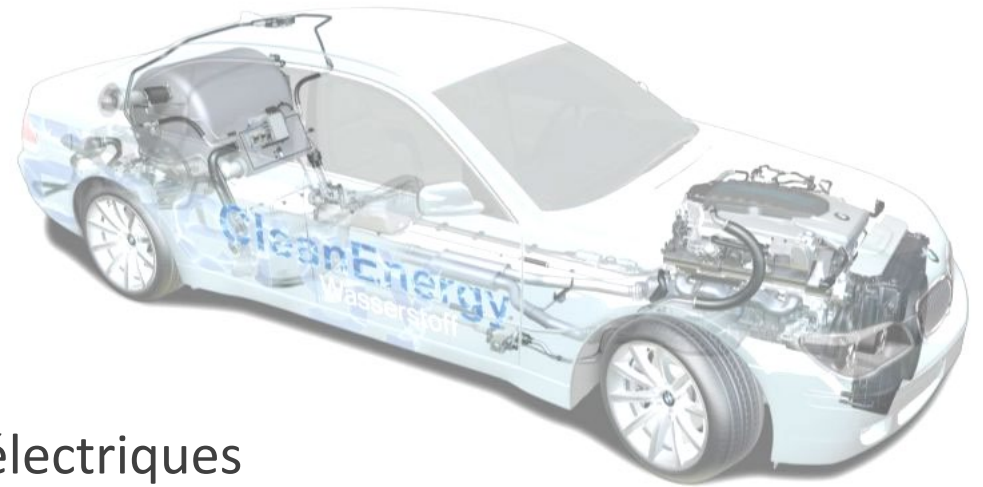


ENR2020



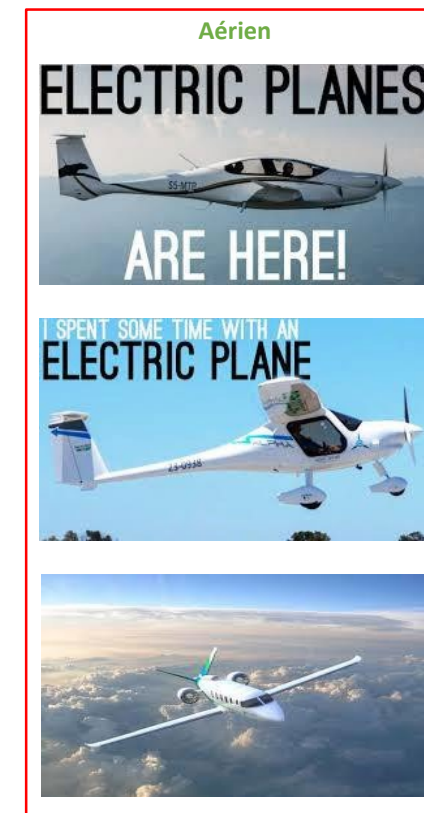
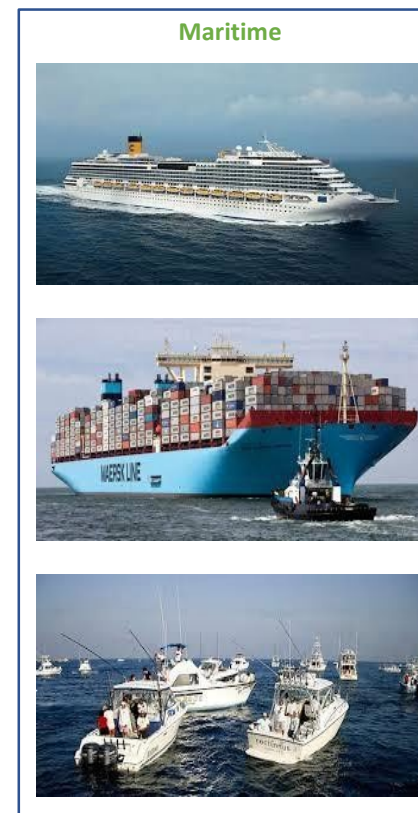
# Utilisations potentielles

- L'hydrogène demain : l'hydrogène renouvelable et décarboné comme vecteur d'énergie
  - Grands potentiels :
    - Faire du stockage d'énergie sur réseau d'électricité
    - Réduire l'empreinte carbone des engrais et de l'industrie chimique
    - Dépolluer une partie des transports
      - Paraît peu prometteur pour les véhicules personnels à cause de la taille du réservoir nécessaire, du poids de la pile à combustible, du coût ; en comparaison avec la batterie Li-ion
  - Potentiels autres :
    - Faire du lissage de production sur les réseaux électriques



# Utilisations potentielles

- L'hydrogène demain : l'hydrogène renouvelable et décarboné comme vecteur d'énergie



# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Propriétés fondamentales
- Production
  - Vaporeformage
  - Renouvelable
- Utilisations
  - Actuelles
  - Potentielles
- ***Conclusion***

# Conclusion

- L'hydrogène possède des propriétés **très atypiques** lorsque comparé aux autres vecteurs énergétiques conventionnels.
  - Très grande densité énergétique massique;
  - Très faible densité énergétique volumique;
  - Fuit facilement.
- L'hydrogène n'est pas une source d'énergie mais un vecteur énergétique, il **doit** être produit.
- Aujourd'hui, il est quasi entièrement produit à partir d'**hydrocarbures fossiles** émetteurs de GES.

# Conclusion

- L'hydrogène peut être produit sans émission de GES de différentes façons;
- Les technologies pour produire cet hydrogène ne sont pas encore tout à fait matures, et sont encore peu concurrentielles face à l'hydrogène conventionnel.



**Merci de votre attention !**

Lorsque cette capsule de formation est présentée en asynchrone (PDF récupérable sur le site du cours), si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit sur le forum et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

# Période de questions

